

## 基于负载均衡的逻辑承载网构建研究

王浩学<sup>1</sup>, 姜明<sup>2</sup>, 付吉<sup>1</sup>

(1. 解放军信息工程大学, 河南 郑州 450001; 2. 杭州电子科技大学 计算机学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 逻辑承载网构建将网络服务需求映射到物理网络, 以增强网络服务的可扩展性。为解决构建效率问题, 借鉴负载均衡思想, 提出了对不同服务需求提供不同网络资源的按需承载策略, 并基于可用资源和链路负载状态, 用改进的多物质流模型进行优化计算。通过仿真实验, 从构建成功率、构建平均收益等方面验证了算法具有更高的网络服务提供能力。

**关键词:** 逻辑承载网; 负载均衡; 服务提供; 多物质流模型

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)09-0038-06

## Research on load-balanced construction algorithm of logical carrying network

WANG Hao-xue<sup>1</sup>, JIANG Ming<sup>2</sup>, FU Ji<sup>1</sup>

(1. The PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;

2. Computer Science College of Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** To improve the extensibility of network service, constructing algorithm of logical carrying network was proposed by mapping the demands of network service into substrate network. To solve the problem of construction efficiency, on-demand carrying strategy was introduced to provide different resources to meet different service requirements. Based on available resource and current link load, an improved multi-commodity flow model was proposed to compute the resource allocation. Simulation results indicate this algorithm can improve network service capability from construction success rate and average construction profit.

**Key words:** logical carrying network; load balancing; service-providing; multi-commodity flow model

### 1 引言

面对大量差异化业务的规模化应用, 现有网络构建方法因协议刚性分层、服务能力单一而无法适应, 问题日趋凸现。面向服务提供的一体化承载网络研究<sup>[1,2]</sup>摆脱传统网络技术体系束缚, 以用户业务需求为驱动, 构建逻辑承载网(LCN, logical carrying network), 提供多样化的网络服务。

逻辑承载网构建是通过全网综合管理系统, 将网络服务需求映射到物理网络资源的过程, 思想与虚拟网构建<sup>[3]</sup>有相似之处。虚拟网构建分虚节点映射和虚链路映射 2 个步骤, 即将虚节点映射到具有最大可用资源的基础节点上<sup>[4,5]</sup>, 以及将每个虚链路映射到 2 个物理网节点间的最短路径上<sup>[5-7]</sup>, 但算法只考虑此次映射成功率, 未考虑网络整体负载状态, 影响后续虚拟网的构建, 尤其在物理资源比较

收稿日期: 2011-12-05; 修回日期: 2012-06-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2012CB315901); 浙江省自然科学基金资助项目(LY12A01019, Y1111192); 浙江省科技计划基金资助项目(2011C13008)

**Foundation Items:** The National Basic Research Program of China (973 Program) (2012CB315901); The Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LY12A01019, Y1111192); Zhejiang Provincial Technical Plan Project (2011C13008)

分散时，无法充分利用粒度较小的物理资源。本文基于路径分割将建网需求映射到片资源，计算网络负载状态，以均衡利用物理资源，构建尽可能多的逻辑承载网，取得最大收益。

## 2 网络模型及问题描述

物理网络用无向多重图  $G_s$  表示， $G_s$  无自环，顶点集合  $V(G_s)$  为网络中的路由交换平台集合，边集  $E(G_s)$  为链路集合。逻辑承载网是  $G_s$  的子图  $G_U$ ，边集和顶点集分别记为  $E(G_U)$  和  $V(G_U)$ 。逻辑承载网构建是将 LCN 构建需求映射到一个  $G_U$ ，即根据 LCN 的需求约束找到相应的  $E(G_U)$  和  $V(G_U)$ 。

多个逻辑承载网建网需求到达时，研究问题抽象为多源多汇问题来求解，即在源、目节点对  $(s_i, t_i)(i=1, L, N)$  间寻求满足建网需求的节点、链路集合。W Szeto<sup>[8]</sup>将多源多汇问题转化为多物质流<sup>[9]</sup>(MCF, multi-commodity flow)模型求解，用于虚拟网资源分配，但构建成功的虚拟网会占用后续虚拟网所需物理网络资源，影响后续虚拟网的构建。

逻辑承载网构建目的是增强物理网络的服务提供能力，即构建尽可能地满足需求的逻辑承载网，同时提高网络资源利用率。因此，本文基于网络的负载状况，在 MCF 算法的基础上，结合 MIRA<sup>[10]</sup>和 LCRA<sup>[11]</sup>算法思想，提出改进的 MMCF (I-MMCF, improved min-cost multi-commodity flow) 算法。

## 3 基于负载均衡的逻辑承载网构建

虚拟网研究多采用节点上所承载的虚拟网的个数来反映节点的负载强度，这是因为虚拟网所考虑的节点大多为主机、服务器等资源，节点的主要资源为 CPU，所承载的虚拟网越多，CPU 负载越重。而逻辑承载网研究的节点是指路由交换平台，其最主要的资源包括 LE(FE)带宽与交换容量。而交换容量是由其端口数与端口速率共同决定的，现有核心路由交换设备的节点强度评价方法并未考虑到节点交换容量的差异，本文采用归一化的方式来屏蔽掉节点交换容量的差异，对各节点、链路当前的流量承载状况进行评价。首先，进行如下定义。

定义 1 链路强度  $S_l$

$$S_l = \frac{1}{B} \sum_{i>0}^P load_i \quad (1)$$

其中， $P$  为经过该链路的 LCN 的路径数量， $load_i$  表

示每条路径所用的带宽，即每个 LCN 为该链路造成的负载， $B$  为该链路总带宽。

定义 2 链路关键性  $KoL(l)$

$$KoL(l) = S_l = \frac{1}{B} \sum_{i=1}^P load_i \quad (2)$$

其中， $KoL(l)$  是衡量该链路对 LCN 构建影响重要程度的指标。令其等于链路强度，即该链路上所有 LCN 负载之和与链路容量的比值。

可以看出， $KoL(l)$  的值越大，表示链路  $l$  越关键，后续映射在链路  $l$  上的逻辑承载网构建成功率就低。

定义 3 链路费用  $c_m$

$$c_m = \frac{KoL(l)}{B_{avail}} \quad (3)$$

其中， $B_{avail}$  为该链路的可用带宽。因此， $c_m$  将链路关键性与链路可用带宽联系在一起，使尽可能多的链路被用于构建 LCN，以均衡地利用网络资源<sup>[11]</sup>。 $B_{avail}$  越大，使用该链路构建 LCN 的费用越小，链路越关键，使用该链路构建 LCN 的费用越大。在以上定义基础上，基于负载均衡思想，将 LCN 构建问题转化为最小费用多物质流(MMCF)<sup>[9]</sup>问题，提出改进的 MMCF 算法，建立数学规划进行求解。

即已知一流网络  $G(V, E)$ ， $V$  为节点  $1, L, n$  所构成的有限集， $E$  为节点对  $(i, j)$  所构成的链路集合， $e_m = (i, j)$ ，其中，链路  $e_m$  的容量为  $b_m$ ，费用为  $c_m, m=1, L, M$ 。假设有  $k$  件物质  $k=1, L, K$ ， $x_m^k$  为链路  $m$  上物质  $k$  的流量。定义为  $k = (s_k, t_k, d_k)$ ，其中， $s_k$  和  $t_k$  是物品  $k$  的源点及汇点，及  $d_k$  是需求。则目标函数为

$$\min \sum_{k,m} x_m^k c_m \quad (4)$$

约束条件为

$$\text{容量约束：} \sum_k x_m^k \leq b_m, m=1, L, M \quad (5)$$

需求约束：

$$\sum_{e_m \in A_n} x_m^k - \sum_{e_m \in B_n} x_m^k = \begin{cases} d_k, n = s_k \\ -d_k, n = t_k \text{ all } n, k \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

基于负载均衡的 I-MMCF 算法描绘如下。

Step1 根据节点位置约束及物理网络节点组件类别约束选择所需节点。

**Step2** 由基础网中各节点所汇报的信息,根据建网跳数限制及带宽需求约束计算出从源到汇所有可能的路径,及各路径的链路可用带宽,组成子图  $G'_s$ 。

**Step3** 根据式(2)计算所有列出链路的关键性,进行降序排列,将关键性最大的链路从  $G'_s$  中删除,得到余留网  $G''_s$ 。

**Step4** 在  $G''_s$  中,计算各链路  $c_m$ ,对于允许路径分割的业务,组成  $k$  可分 MMCF 约束条件,进行求解。如有解,将结果构成逻辑承载网信息,到 Step6。如无解,到 Step5。

**Step5** 对于 Step4 无解的构建请求,等待下一个周期网络资源的释放,到 Step2。

**Step6** 将逻辑承载网信息配置到物理承载节点,为数据建立路由交换通路。

为使算法易于网络部署,本文做如下限定假设:减少路径匹配的条数为 2。即带宽需求为  $B_{req}$  的业务,被匹配到 2 条不相交的独立路径资源  $B_{p1}$  和  $B_{p2}$  上,满足  $B_{p1} + B_{p2} = B_{req}$ 。

## 4 仿真及结果

为衡量算法的性能,与使用最短路径进行链路映射的 VNE-baseline 算法及 VNE-splitting 算法<sup>[7]</sup>性能加以比较。其中,VEA-baseline 以最大可用资源为标准选取节点,将选取的节点用  $k$ -shortest 最短路径寻路算法相连;VNE-splitting 节点映射仍以最大可用资源为标准,采用多物质流模型中的最大流方法进行链路映射。

### 4.1 仿真环境

对 VNE-baseline 和 VNE-splitting 算法所采用的虚拟网嵌入仿真软件 VN embedding simulator(简称 VNES)进行修改,生成适合逻辑承载网构建的仿真平台。VNES 主要由节点映射算法、链路映射算法等模块组成,将其节点映射算法模块移除,链路映射算法修改为 I-MMCF 算法,生成本文所需 LCN 构建仿真平台。

使用 GT-ITM 随机产生 50 个节点组成的基础网拓扑,拓扑中任何节点都可以作为逻辑承载网的节点。每对节点的连接概率是 0.5,带宽资源在 50 到 100 间均匀分布,LCN 请求到达过程服从以 100 时间单位均值为 5(单位:个)为参数的泊松过程,即  $l = 5$  (为考察不同负载到达的影响,还进行了

$l = 10$  的仿真);每个 LCN 的生存时间服从参数为  $m = 1000$  的指数分布。LCN 节点数在 2 到 10 之间均匀分布,而带宽需求在 0 到 50 之间均匀分布,实验共进行 5 次。用下列 4 个指标来衡量构建算法。

1) 网络构建成功率。网络构建成功率是一段时间内算法构建成功的 LCN 数占总构建请求数的百分比。即

$$\bar{C} = \frac{\text{构建成功的 LCN 个数}}{\text{LCN 构建总请求数}} \quad (7)$$

2) 最大节点强度与平均节点强度。节点强度  $S_n$  定义为节点上所承载的逻辑承载网带宽之和占节点总交换容量的比重。

$$S_n = \frac{\sum_{k=1}^K B_k}{B_{\text{switching}}} \quad (8)$$

其中,  $B_k$  为第  $k$  个逻辑承载网所用带宽,  $K$  为所承载的逻辑承载网个数,而  $B_{\text{switching}}$  为节点总的交换容量。

最大节点强度是路由交换节点承载的逻辑承载网  $S_n$  的最大值,最大节点强度用以衡量算法对节点的均衡使用。平均节点强度是路由交换节点承载逻辑承载网  $S_n$  的数学期望,即

$$\overline{S_n^{V^s}} = \frac{\sum S_n}{N} \quad (9)$$

其中,  $V^{\text{LCN}}$  为 LCN 节点,  $V^s$  为物理网节点,  $N$  为物理网络节点数。

3) 平均链路利用率。平均链路利用率是构建的逻辑承载网络所占链路带宽之和与物理网络分配的所有链路资源带宽之和的比值。平均链路利用率用以衡量算法对链路的均衡使用。

$$\bar{U}_l = \frac{\sum_{e \in e^s} B_{e^{\text{LCN}}}}{\sum_{e \in e^s} B_e} \quad (10)$$

4) LCN 构建平均收益。构建收益是服务提供商构建 LCN 后,形成服务能力卖给业务提供商所获得的收益,与业务提供商所需的 LCN 带宽  $bw_i(l^v)$  成正比,构建平均收益为一段时间内网络构建收益的平均值。

$$\overline{R(G^v(t))} = \frac{\sum_{t=0}^T \sum_i \sum_{l^v \in L^v} bw_i(l^v)}{T} \quad (11)$$

### 4.2 仿真结果及性能分析

仿真结果如图 1 和图 2 所示，图中，横轴为到来的 LCN 构建请求中，允许路径分割的建网请求占总请求数的比例(简称为允许分流的比率)。例如，0%代表不允许任何业务路径分割，而 100%代表所有的建网请求都允许路径分割。考察不同请求到达速率  $l$  ( $l=5, a=10$ ) 下，不同路径分割需求对 LCN 构建所造成的影响，及各算法对网络构建效率及服务能力的贡献。

1) 请求到达率  $l=5$

由图 1(a)可以看出，VEA-baseline 构建成功率略高于 55%，是 3 种算法中较低的，并且不随允许分流的比率发生变化。VNE-splitting 和 I-MMCF 由于允许路径分割，构建成功率会随着允许路径分割的比率增加而增加，由于 I-MMCF 每次分配资源时，将链路负载与可用带宽一起考虑，剩余资源均衡性更好，当允许分流的比率超过 60%时，构建成功率比 VNE-splitting 大约高出 7%左右。

从图 1(b)可看出，因为允许路径分割的请求越

多，构建 LCN 的收益越大，如果所有请求都允许路径分割，VNE-splitting 算法得到的收益大概是允许路径分割算法的 120%。而 I-MMCF 和 VNE-splitting 都允许路径分割，故 I-MMCF 比 VNE-splitting 的构建平均收益  $R$  并没有相应增加，但都高于 VEA-baseline。

图 1(c)是随着允许路径分割的请求数增多，平均链路利用率的变化。可以看出，当少部分业务允许路径分割时，I-MMCF 和 VNE-splitting 算法的平均链路利用率有大约 30%的增加，而当允许分流的比率逐渐增加到 100%时 I-MMCF 和 VNE-splitting 算法的平均链路利用率显著提高，比不允许路径分割的算法大约有 40%左右的增加。

由于 VNE-splitting 算法选取可用资源最大的节点进行节点映射，而 I-MMCF 在支持路径分割的同时，比 VNE-splitting 更注重避免过多使用关键性高的资源，资源使用均衡性更强。从图 1(d) 可看出，网络最大节点强度 VNE-splitting 比 I-MMCF 要高，说明 VNE-splitting 对个别节点多次使用，使其负载相对过重。

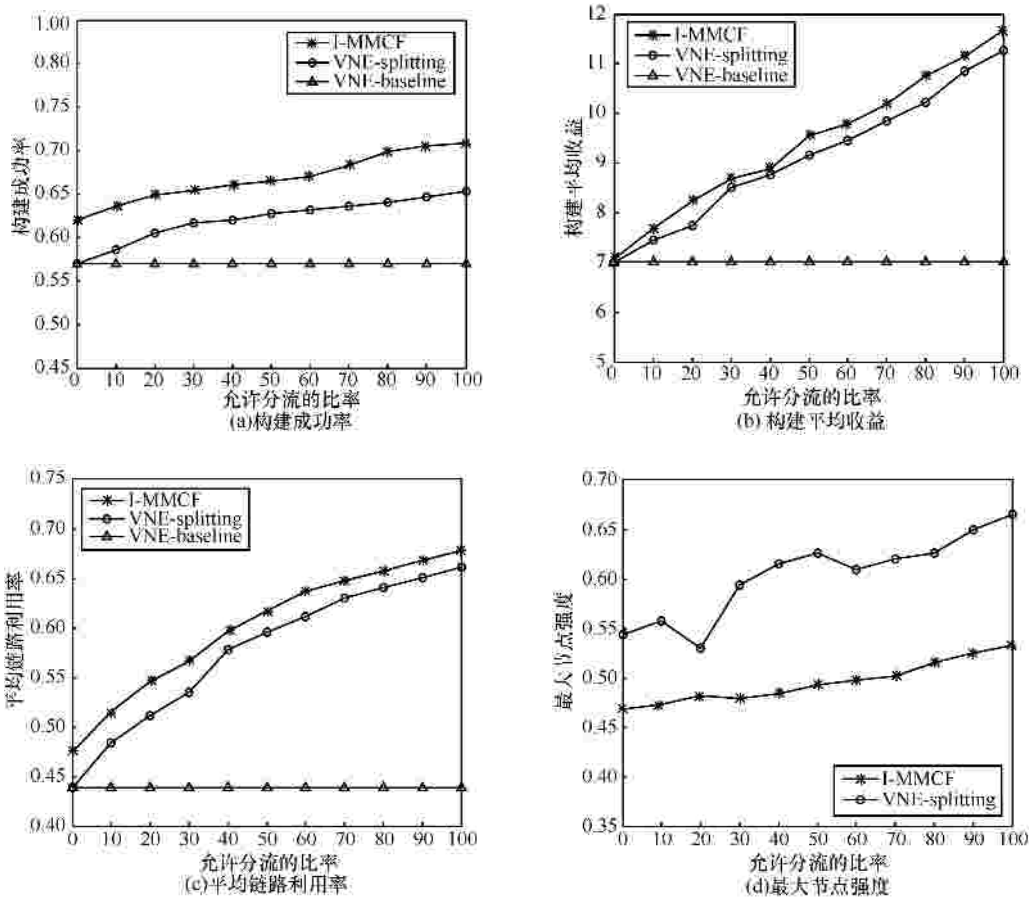


图 1  $l=5$  时 LCN 构建性能比较

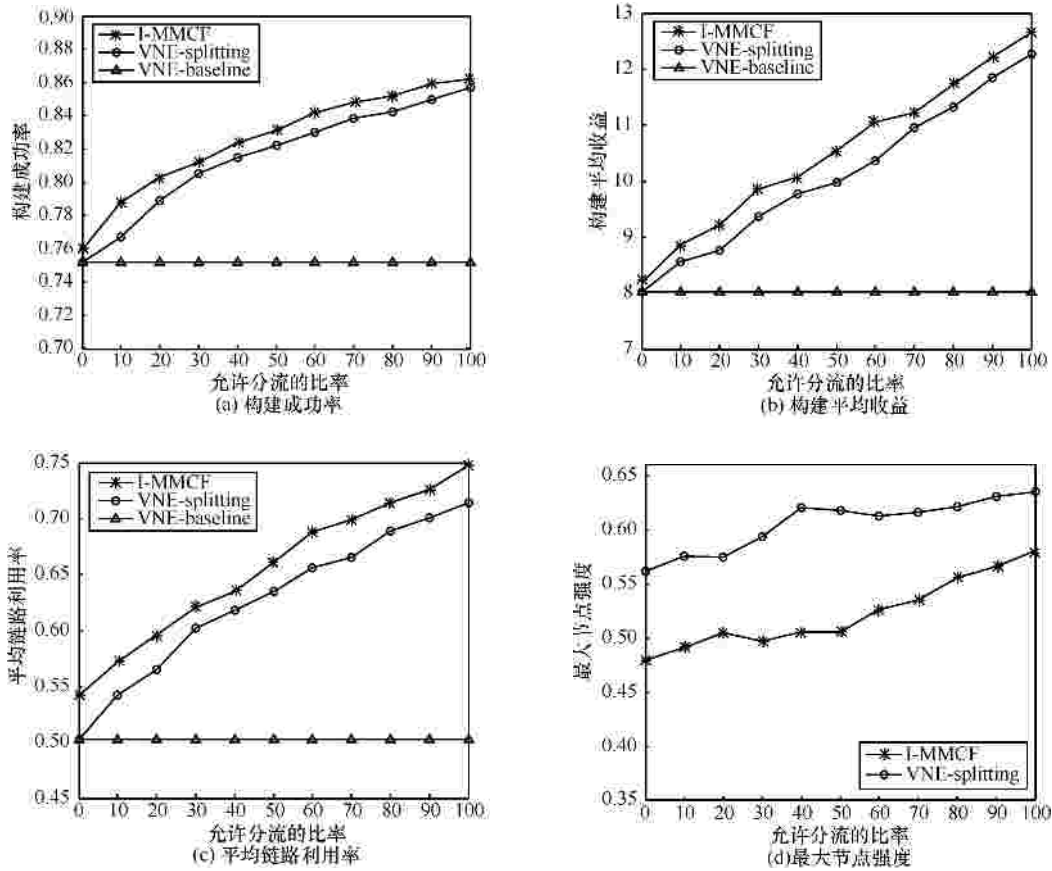


图 2  $l = 10$  时 LCN 构建性能比较

### 2) 请求到达率 $l = 10$

从图 2(a)可以看出,随着负载增大,构建成功率提高并不明显。由于负载增加的速度快,即使考虑了资源均衡使用的 I-MMCF 算法也没有取得明显的优势。还可看出,当构建请求中对 LCN 规模需求较大时,即 LCN 节点数较多,即使采用基于负载均衡的构建方法,也不一定能够构建成功。这说明,基于负载均衡的构建方法是一种提高效率的构建方法,当这种方法也不能构建成功时,说明网络的物理资源已不能满足构建需求。

## 5 结束语

I-MMCF 算法将逻辑承载网构建需求映射到不同粒度网络资源,将已存在的网络负载及物理网剩余资源映射为链路费用,既能区别对待具有不同服务能力的节点及链路,又增强了物理资源利用的可扩展性。模拟实验结果表明,基于负载均衡的多粒度映射策略可以提高物理承载资源利用的灵活性,提高构建效率。在物理承载网负载均衡时,优势最大。

## 参考文献:

- [1] 汪斌强, 邬江兴. 下一代互联网的发展趋势及相应对策分析[J]. 信息工程大学学报, 2009, 10(1):1-10.  
WANG B Q, WU J X. Development trends and associated countermeasures analysis for NGN[J]. Journal of Information Engineering University, 2009, 10(1):1-10.
- [2] 王浩学, 汪斌强, 于婧等. 一体化承载网络体系架构研究[J]. 计算机学报, 2009, 32(3): 371-376.  
WANG H X, WANG B Q, YU J, et al. Research on architecture of universal carrying network[J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(3): 371-376.
- [3] PETERSON L, SHENKER S, TURNER J. Overcoming the internet impasse through virtualization[J]. IEEE Computer, 2005, 38(4):34-41.
- [4] YU M, YI Y, REXFORD J. Rethinking Virtual Network Embedding: Substrate Support for Path Splitting and Migration[R]. Princeton University, Technical Report TR-788-07, 2007.
- [5] RICCI R. A solver for the network testbed mapping problem[J]. ACM Computer Communication Review, 2003, 33(2):65-81.

- [6] LU J, TURNER J. Efficient Mapping of Virtual Networks onto a Shared Substrate[R]. Washington University, Technical Report WUCSE-2006-35,2006.
- [7] YU M, YI Y, JENNIFER R, *et al.* Rethinking virtual network embedding: substrate support for path splitting and migration[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008,38(2):17-29.
- [8] SZETO W, IRAQI Y, BOUTABA R. A multi-commodity flow based approach to virtual network resource allocation[A]. IEEE GLOBECOM 2003[C]. San Francisco, USA, 2003. 3004-3008.
- [9] AHUJA R K, MAGNANTI T L, ORLIN J B. Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications[M]. London: Prentice Hall, 1993.
- [10] KODIALAM M S, LAKSHMAN T V. Minimum interference routing with applications to MPLS traffic engineering[J]. Proc of IEEE INFOCOM, 2000,36(2): 884-893.
- [11] 唐治果, 李乐民, 虞红芳. 针对 MPLS 网络流量工程的链路关键性路由算法[J]. 电子与信息学报, 2007,29(5):1187-1190.  
TANG Z G, LI L M, YU H F. Link criticality routing algorithm for MPLS traffic engineering[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007,29(5):1187-1190.

## 作者简介：



王浩学(1976-),男,河南洛阳人,博士,解放军信息工程大学讲师,主要研究方向为新一代网络和网络虚拟化。



姜明(1974-),男,江苏如皋人,博士,杭州电子科技大学副教授,主要研究方向为网络 QoS。



付吉(1979-),男,湖北宜城人,硕士,解放军信息工程大学讲师,主要研究方向为计算机网络。